

근거리 미사일방어시스템 성능분석을 위한 전차 구동 모델링 기법

Method of MBT Movement Modeling for Performance Analysis of SRMD System

하 종 수*

Jong-Soo Ha

조 규 공*

Kyu-Gong Cho

Abstract

SRMD system which protects MBT from the threats in a short range is composed of 2 radars, 2 IRTs, 1 CCU and 2 countermeasures. To analyze the performance of this system, there is a need to make the model of MBT on which this system is loaded. In this paper, a method of MBT movement modeling is proposed to fulfill the above need. The methods of the coordinate system transformation among the components and the modeling of a hull's traveling and a turret's turning are proposed. The method of the modeling of a pose variation caused by the vibrations is proposed and the results of the modeling are presented.

Keywords : Modeling(모델링), Analysis(분석), SRMD(근거리 미사일방어), MBT(전차)

1. 서론

능동파괴체계(Hard-Kill System)는 근거리 미사일방어(SRMD : Short Range Missile Defense) 시스템으로서 전차(MBT : Main Battle Tank)에 탑재되어 대전차 미사일을 탐지/추적한 후 대응탄을 발사하여 무력화시키는 것을 목적으로 한다.

본 시스템은 위협체를 탐지하는 센서인 탐지추적레이더와 열상탐지추적기, 위협판단 및 대응을 통제하는 장치인 통제컴퓨터, 위협체를 무력화시키는 대응수단

인 발사장치와 대응탄으로 구성된다^[1]. 따라서 본 시스템의 성능을 분석하기 위해서는 이러한 구성품들과 함께 구성품 간의 연동을 통한 교전성능을 분석하여야 한다.

그러나 이렇게 분석된 교전성능결과는 시스템이 탑재되는 체계의 특성에 의해 영향을 받는다. 더구나 본 시스템이 탑재되는 K2전차^[2]의 경우 주행 뿐만 아니라 포탑의 선회 구동을 하며, 험지 기동으로 인한 잔진동 등에 의한 자세 변화가 주기적으로 발생하기 때문에 고정밀을 요구하는 본 시스템의 교전성능에 많은 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 이러한 성능을 분석하기 위한 전차 구동 모델링 기법을 제안한다. 장착된 구성품과 전차 간 좌표 변환 기법과 전차의 주행 및 선회 구동을 모

† 2010년 12월 2일 접수~2011년 3월 25일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 하종수(jsha@add.re.kr)

모델링하기 위한 기법, 그리고 잔진동이나 지면에 의해 발생하는 자세 변화를 모델링하기 위한 기법을 제안하며, 모델링 및 성능분석 결과를 통해 제안하는 기법의 효용성을 검증한다.

2. SRMD 시스템 성능분석

SRMD 시스템의 성능분석은 Fig. 1과 같은 개념으로 수행된다^[3]. 이를 위해 각 모델을 객체 지향적으로 구현하여 교전성능을 구하게 되는데 각 모델마다 고유의 오차요소를 포함하므로, 이러한 불확실성은 몬테카를로 기법을 적용하여 Fig. 1의 일련의 절차를 반복적으로 시뮬레이션함으로써 성능분석을 수행한다.

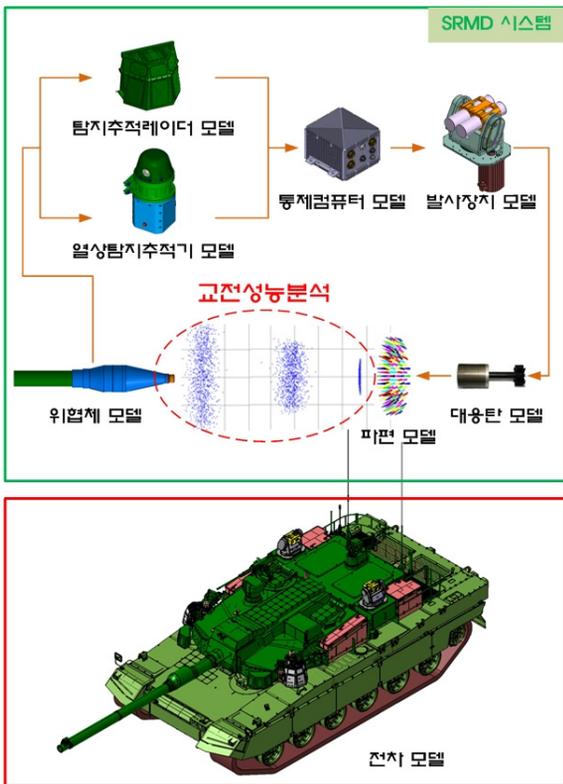


Fig. 1. SRMD 시스템 모델링 구성도

위 그림에서 위험체 모델을 통해 생성된 위협체의 위치, 거리, 속도 정보를 바탕으로 레이더와 열상 모델에서는 탐지/추적 정보를 산출하며, 이를 바탕으로 통제컴퓨터 모델에서는 위협판단 및 대응을 제어하여

발사장치 모델로 대응명령을 내린다. 발사장치 모델에서는 통제컴퓨터에서 지시한 위치로 주어진 시간에 대용탄 모델을 발사하게 되고, 대용탄 모델은 모델 특성에 맞게 비행하여 주어진 시간에 파편 모델을 비산한다. 이렇게 비산된 파편 모델과 위협체 모델 간의 충돌 개수 및 위치를 분석함으로써 교전성능을 분석한다. 그러나 본 시스템이 전차에 탑재될 경우 전차의 기동 특성이 교전성능에 영향을 미치므로 전차를 모델링하여 교전성능분석에 반영할 필요가 있다.

3. 전차 구동 모델링 기법

제안하는 전차 구동 모델링 기법은 좌표 변환 기법, 전차 주행 모델링, 포탑 선회 모델링, 자세 변화 모델링으로 구분할 수 있다. 이 때 각각의 모델링은 독립적으로 구현되며, 시뮬레이션 수행 시 시간의 흐름에 따라 유기적으로 연동되어 전차의 기동을 모사하게 된다. 본 논문에서는 좌표 변환의 경우 공간상 관계에서 좌표계 간 변환하는 방법과 직교/구 좌표 간 변환하는 방법을 제시하며, 전차의 특성 모델링의 경우 시간 영역에 대한 운동방정식을 이용해 구현하는 방법과 실제 전차의 특성을 반영하는 방법을 제시한다.

가. 좌표 변환

Fig. 2와 같이 두 좌표계 간 관계에서 중심(C : Center) 좌표계와 국부(L : Local) 좌표계 간의 변환은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 점 p 는 $p(x_p, y_p, z_p)$ 에 있다고 가정한다.

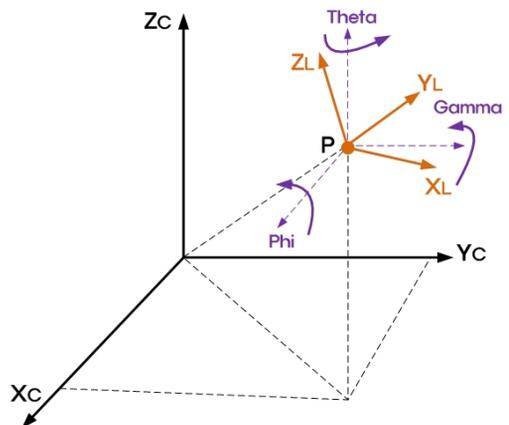


Fig. 2. 좌표계 간 변환 개념도

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = m_{z_{l2c}} \cdot m_{y_{l2c}} \cdot m_{x_{l2c}} \cdot \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$m_{x_{l2c}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_p) & -\sin(\phi_p) \\ 0 & \sin(\phi_p) & \cos(\phi_p) \end{bmatrix}$$

$$m_{y_{l2c}} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_p) & 0 & \sin(\gamma_p) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\gamma_p) & 0 & \cos(\gamma_p) \end{bmatrix}$$

$$m_{z_{l2c}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & -\sin(\theta_p) & 0 \\ \sin(\theta_p) & \cos(\theta_p) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

위 식에서 $m_{x_{l2c}}$, $m_{y_{l2c}}$, $m_{z_{l2c}}$ 는 x, y, z축을 기준으로 국부 좌표계에서 중심 좌표계로의 변환 행렬을 나타낸다^[4]. 이를 이용하여 국부 좌표계 (x_l, y_l, z_l) 는 중심 좌표계 (x_c, y_c, z_c) 로 변환되며, 역으로 중심 좌표계에서 국부 좌표계로의 변환은 그 역변환을 취하면 수행된다.

1) 구성품 / 전차 간 좌표계 변환

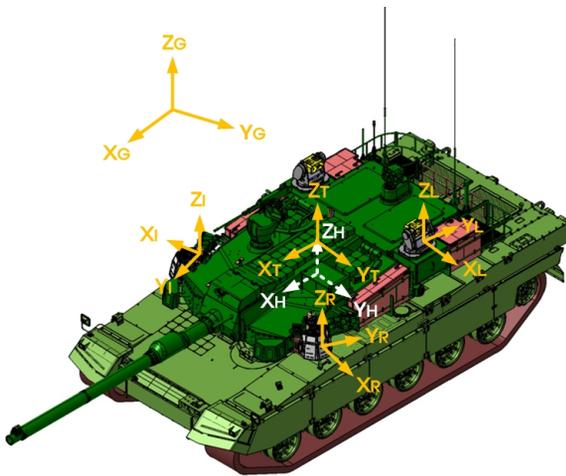


Fig. 3. SRMD 시스템/전차 좌표계 간 관계도

SRMD 시스템의 구성품과 전차 간 좌표계 관계는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 좌표는 전체 (G : Global) 좌표계, 포탑(T : Turret) 좌표계, 차체(H : Hull) 좌표계, 레이더(R : Radar) 좌표계, 열상(I : Infrared) 좌표계, 발사장치(L : Launcher) 좌표계로 분

류할 수 있다. 이러한 좌표계들은 식 (2)와 같이 전체 좌표계와 포탑/차체 좌표계 간 관계에서 전체 좌표계가 중심이 되고 포탑/차체 좌표계가 국부 좌표계가 되며, 식 (3)과 같이 포탑/차체 좌표계와 레이더/열상/발사장치 좌표계 간 관계에서는 포탑/차체 좌표계가 중심이 되고 레이더/열상/발사장치 좌표계가 국부 좌표계가 된다. 이 때 각 좌표계들의 공간상 거리는 임의의 점 $p(x_p, y_p, z_p)$ 에 있다고 가정한다.

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = m_{z_{l2c}} \cdot m_{y_{l2c}} \cdot m_{x_{l2c}} \cdot \begin{bmatrix} x_{t(or h)} \\ y_{t(or h)} \\ z_{t(or h)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_{t(or h)} \\ y_{t(or h)} \\ z_{t(or h)} \end{bmatrix} = m_{z_{l2c}} \cdot m_{y_{l2c}} \cdot m_{x_{l2c}} \cdot \begin{bmatrix} x_{r(or l, i)} \\ y_{r(or l, i)} \\ z_{r(or l, i)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

2) 직교 / 구 좌표 간 변환

SRMD 시스템의 각 구성품은 구성품의 특성에 따라 직교 좌표 또는 구 좌표를 사용한다. Fig. 4에 이들 좌표 간 변환 관계를 도시하였다. 직교 좌표 $p(x_p, y_p, z_p)$ 는 식 (4)에 의해 구 좌표 $p(\theta_p, \phi_p, r_p)$ 로 변환할 수 있으며 역으로 구 좌표에서 직교 좌표로의 변환은 식 (5)에 의해 수행할 수 있다^[5].

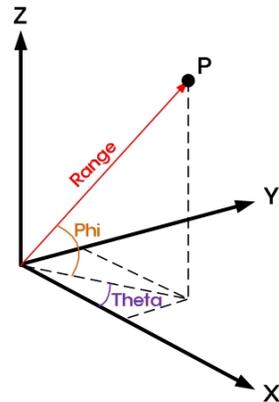


Fig. 4. 직교좌표/구좌표 간 관계도

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{y_p}{x_p}\right), \quad (4)$$

$$\phi_p = \tan^{-1}\left(\frac{z_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}}\right),$$

$$r_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2}$$

$$x_p = r_p \cdot \cos(\phi_p) \cdot \cos(\theta_p), \quad (5)$$

$$y_p = r_p \cdot \cos(\phi_p) \cdot \sin(\theta_p),$$

$$z_p = r_p \cdot \sin(\phi_p)$$

나. 전차 주행

SRMD 시스템의 교전성능에 대해 전차 주행은 등속·가속·감속의 형태로 영향을 미친다. 이러한 형태를 모델링하기 위해 본 논문에서는 수식을 이용하는 방법과 실제 데이터를 적용하는 방법을 제시한다.

1) 수식 적용

등속·가속·감속을 모델링하기 위해 초속 v_{stt} 와 종속 v_{end} 를 설정하여 식 (6)과 같이 전차 주행 속도 및 전차 이동거리를 연산한다.

$$t_{estm} = \frac{2l}{(v_{stt} + v_{end})}, \quad (6)$$

$$t_{smp} = [0 : dt : t_{estm}],$$

$$v_h = \frac{v_{end} - v_{stt}}{t_{estm}} \cdot t_{smp} + v_{stt}$$

$$r_h(n) = v_h(n)dt + r_h(n-1)$$

위 식에서 l 은 전차의 전체 이동거리이며, dt 는 연산시간단위, $r_h(n)$ 과 $v_h(n)$ 은 n 번째 데이터에서 전차 주행거리와 주행속도이다.

2) 실제 데이터 적용

K2전차의 주행 속도와 시간에 관한 실제 데이터를 적용하는 흐름도를 Fig. 5에 나타내었다. 이 때 시뮬레이션 수행시간이 데이터 량을 초과할 경우 해당하는 데이터가 없으므로 그 전 데이터의 LSE(Least Square Error)^[6]를 계산하여 가속도 $Acc(n)$ 을 구하고 이를 이용하여 전차의 주행속도와 주행거리를 연산한다.

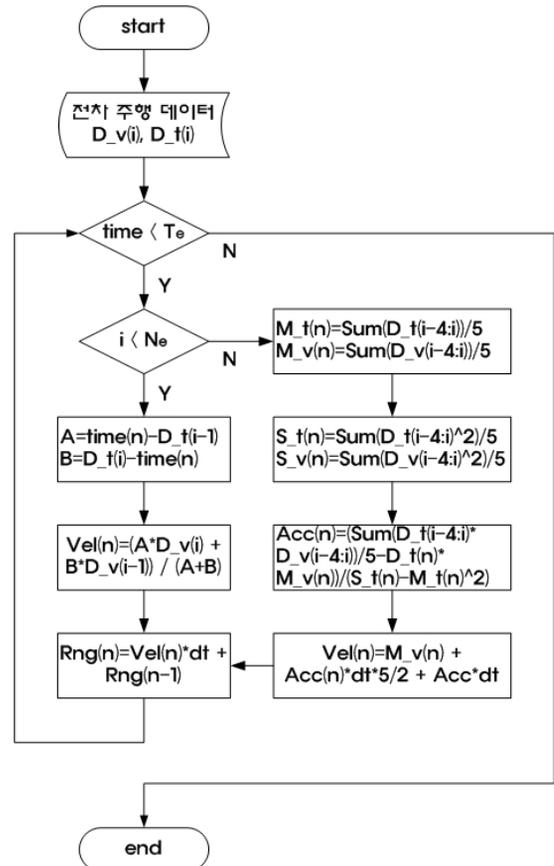


Fig. 5. 전차 주행 데이터 적용 흐름도

위의 흐름도를 이용하여 생성한 전차 주행속도 그래프를 Fig. 6에 도시하였다. 이 경우 시뮬레이션 수행시간을 짧게 설정하였기 때문에 가속구간만 나타남을 확인할 수 있다.



Fig. 6. 전차 주행속도 그래프

다. 포탑 선회

포탑 선회도 전차 주행과 동일하게 등속·가속·감속의 형태로 나타난다. 이를 모델링하기 위해 수식을 이용하는 방법과 실제 데이터를 적용하는 방법을 사용한다.

1) 수식 적용

포탑 선회를 모델링하기 위해 선회 속도 v_t 와 가속도 a_t , 초기각도 θ_{stt} , 그리고 선회 시작 시간 t_{stt} 를 설정하여 식 (7)과 같이 선회 각도를 계산한다. 전차의 포탑은 z축을 중심으로 선회 구동을 하므로 국부 좌표계에서 중심 좌표계로의 변환 행렬 m_{t2c} 는 식 (7)과 같다. n 은 n 번째 데이터를 나타낸다.

$$v_t(n) = a_t \cdot (t(n) - t_{stt}) + v_t(n-1) \quad (7)$$

$$\theta_t(n) = \theta_{stt} + v_t(n) \cdot (t(n) - t_{stt})$$

$$m_{t2c}(n) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_t(n)) & -\sin(\theta_t(n)) & 0 \\ \sin(\theta_t(n)) & \cos(\theta_t(n)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2) 실제 데이터 적용

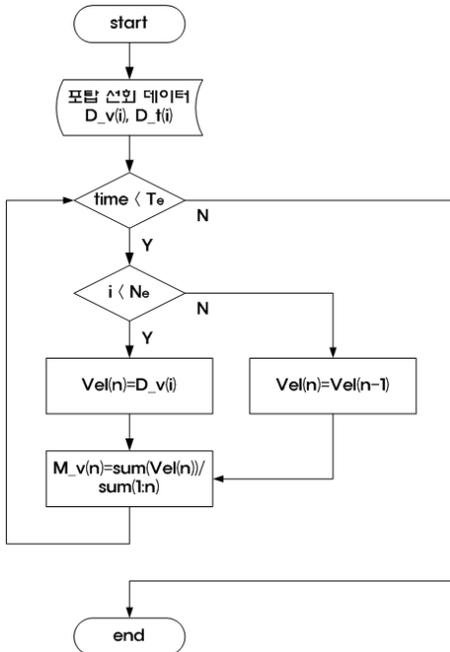


Fig. 7. 포탑 선회 데이터 적용 흐름도

K2전차의 포탑 선회 속도와 시간에 관한 실제 데이터를 적용하는 흐름도를 Fig. 7에 나타내었다. 이 때 시뮬레이션 수행시간이 데이터 양을 초과할 경우 전차 주행의 경우와는 달리 포탑이 계속 선회한다고 가정하여 그 전 데이터를 그대로 사용하도록 설계하였다. 흐름도의 결과값은 $v_t(n)(= Vel(n))$ 이며 $M_v(n)$ 은 평균 선회 속도이다.

위의 흐름도를 이용하여 생성한 포탑 선회속도 그래프를 Fig. 8에 도시하였다. 이 경우 일정하게 가속하여 일정 시간 후 등속을 유지함을 확인할 수 있다.

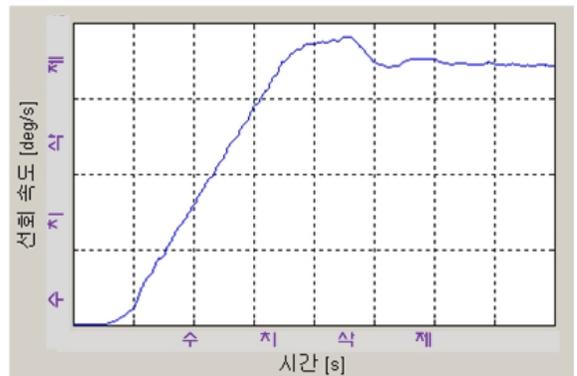


Fig. 8. 포탑 선회속도 그래프

라. 자세 변화

전차의 자세 변화는 잔진동이나 지면의 영향에 의해 나타나며 진폭의 주기적 변화의 형태로 나타난다. 이를 모델링하기 위해 수식을 이용하는 방법과 실제 데이터를 적용하는 방법을 사용한다.

1) 수식 적용

자세 변화를 모델링하기 위해 변화각 a_{pth} 와 변화 주기의 역수 f_{pth} 를 사용하여 주기 함수 ϕ_{pth} 를 식 (8)과 같이 생성한다. 전차 주행 시의 자세 변화를 모델링하므로 변환 행렬 m_{t2c} 는 pitch 방향, 즉 y축을 중심으로 변환하도록 식 (8)과 같이 연산한다. n 은 n 번째 데이터를 나타낸다.

$$\phi_{pth}(n) = a_{pth} \cdot \cos(2\pi f_{pth} t(n)) \quad (8)$$

$$m_{t2c}(n) = \begin{bmatrix} \cos(-\phi_{pth}(n)) & 0 & \sin(-\phi_{pth}(n)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\phi_{pth}(n)) & 0 & \cos(-\phi_{pth}(n)) \end{bmatrix}$$

2) 실제 데이터 적용

K2전차의 주행 시의 자세 변화와 시간에 관한 실제 데이터를 적용하는 흐름도를 Fig. 9에 나타내었다. 이때 시뮬레이션 수행시간이 데이터 량을 초과할 경우 전체 데이터가 처음부터 다시 반복되도록 설계하였다. 위의 흐름도를 이용하여 생성한 전차 자세변화 그래프를 Fig. 10에 도시하였다. 이 경우 전차의 자세가 주기적으로 계속 변화함을 확인할 수 있다.

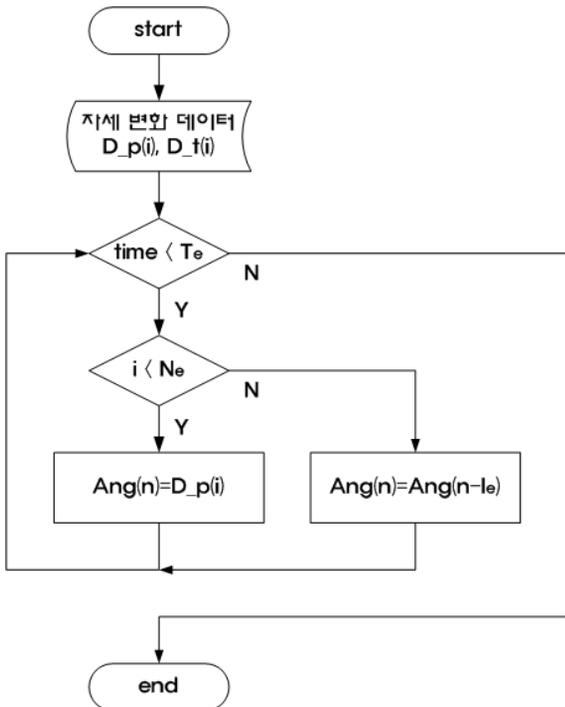


Fig. 9. 자세 변화 데이터 적용 흐름도

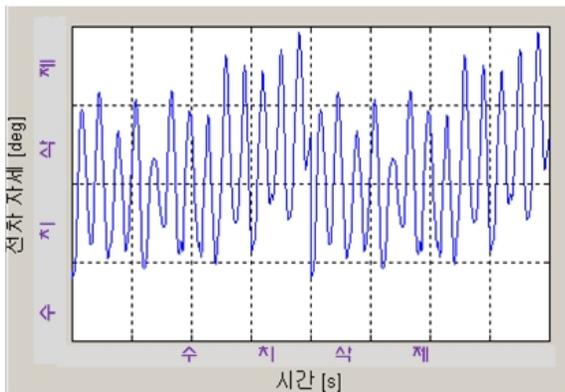


Fig. 10. 전차 자세변화 그래프

4. 전차 구동 모델링 결과

전차 구동 모델링 결과를 Fig. 11에 도시하였다. 그림은 전차 구동 모델링 GUI를 나타내는데, 전차의 주행 조건을 시작 조건/도달 조건/자세 변화로 구분하고, 시작과 도달 조건은 전차의 위치를 나타내기 위한 거리/방위각/고각 조건과 속도 조건을 설정하도록 설계하였으며 자세 변화는 각도와 주기를 설정하도록 설계하였다. 포탑 선회 조건은 속도/가속도/초기각도/시작 시간을 설정하도록 설계하였으며, 주행 속도/선회 속도/자세 데이터의 사용을 선택할 수 있도록 설계하였다.

이와 같은 조건 설정을 통해 다양한 전차의 구동을 모델링할 수 있으며, 그 결과 3차원 또는 2차원으로 전차 구동 모델링 결과를 확인할 수 있으며, 그 외 전차 형상 및 주행 속도/선회 속도/자세 변화의 그래프를 GUI를 통해 확인할 수 있다.

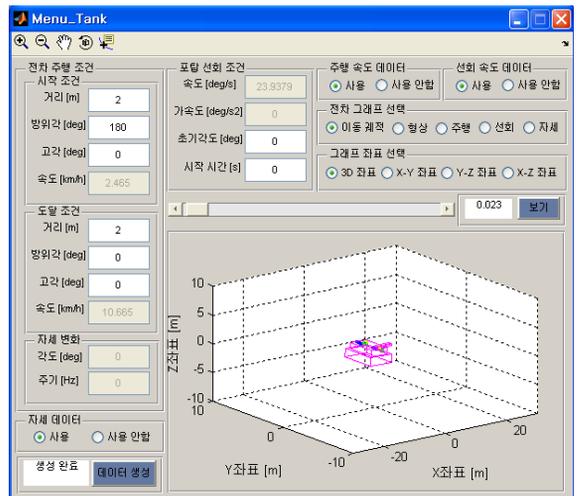


Fig. 11. 전차 구동 모델링 GUI

5. SRMD 시스템 성능분석 결과

이와 같이 구현된 전차 구동 모델링 결과가 SRMD 시스템의 성능분석에 미치는 영향을 분석하기 위해 전차 구동 모델이 적용되었을 경우와 적용되지 않은 경우 통제컴퓨터에서 연산한 교전지점의 오차를 Table 1에 분석하였다. 이 때 교전지점은 발사장치와 대응단에 의한 오차는 반영되지 않은 연산값을 의미한다. 전

차 구동 모델링 조건은 전차 주행속도 xxkm/h, 포탑 선회속도 xxdeg/s, 자세변화 xxdeg/Hz로 설정하였다.

Table 1. 전차구동형태별 교전연산오차(수치 삭제)

전차구동형태	교전연산오차 (x, y, z, error)
전차 정지	x.x63, x.x21, x.x30, x.x88
전차 주행	x.x65, x.x95, x.x32, x.x75
포탑 선회	x.x20, x.x04, x.x72, x.x67
자세 변화	x.x98, x.x10, x.x25, x.x34
종합구동 (주행/선회/자세변화)	x.x37, x.x56, x.x00, x.x38

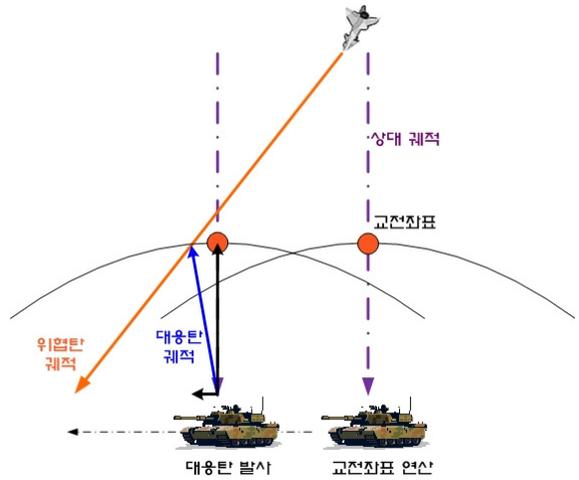


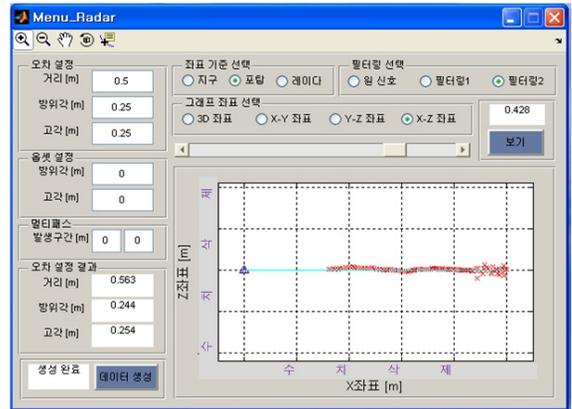
Fig. 13. 전차주행 시 위협체/교전좌표 간 관계

위 결과를 바탕으로 전차구동형태별 교전연산오차를 Fig. 12에 도시하였다.

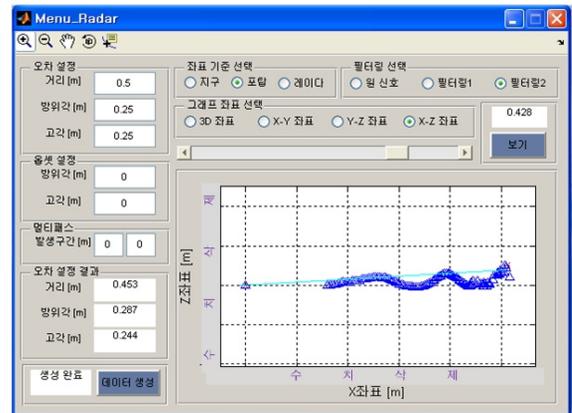


Fig. 12. 전차구동형태별 교전연산오차

전차 구동 모델링 조건에 따라 달라지지만 전차의 진동이 심할 경우, 전차의 자세 변화에 의해 발생하는 교전연산오차가 시스템 허용오차 범위 내에서 약 xx% 증가함을 위 그림에서 확인할 수 있다. 전차 주行的 경우 Fig. 13에서 보듯이 통계컴퓨터에서 연산한 값이 속도 벡터 성분을 포함하기 때문에 전차 주행에 의해 발생하는 오차 성분을 보상한다. 따라서 전차 정지와 교전연산오차가 거의 동일하게 나타난다. 포탑 선회의 경우에는 통계컴퓨터에서 선회 보상을 별도로 수행하기 때문에 전차 정지의 경우에 비해 약 xx% 정도 교전연산오차가 증가한다.



(a) 전차 정지



(b) 전차 주행/포탑 선회/자세 변화

Fig. 14. 레이더 탐지/추적 결과 비교

그러나 자세 변화의 경우에는 통제컴퓨터에서 별도로 보상하는 과정이 없기 때문에 자세 변화가 심할 경우 레이더와 열상 모델의 탐지/추적 정보에 오차가 많이 더해질 수밖에 없으며 이로 인해 교전연산오차도 증가할 수밖에 없다. Fig. 14에 전차 정지와 종합 구동(주행/선회/자세변화) 경우 레이더 탐지/추적 결과를 도시하였다.

위 그림에서 전차의 진동에 의한 자세 변화로 인해 (b)의 탐지/추적 정보가 z(위/아래) 방향으로 많이 왜곡됨을 알 수 있다. 따라서 Table 1에서 자세 변화나 종합 구동 시 z값이 많이 왜곡되었으며 이로 인해 교전연산오차가 많이 증가하였다.

6. 결론

본 논문에서는 SRMD 시스템이 탑재되는 전차의 주행 및 포탑 선회, 그리고 자세 변화를 모델링하기 위한 기법을 제안하였다. 구성품 및 전차 간 좌표계 변환을 통해 각 구성품에서 연산하는 좌표값이 어떻게 변환되는지를 제시하였으며, 직교 좌표와 구 좌표 간 변환을 통해 서로 다른 좌표값 간의 변환 방법을 제시하였다.

운동 방정식에 기반한 수식 및 실제 데이터를 확장

적용하여 전차 주행 정보 및 포탑 선회 정보, 그리고 자세 변화 정보를 생성하는 기법을 제안함으로써 전차 구동을 모델링하기 위한 설계 기법을 제시하였다. 이를 바탕으로 GUI 기반 전차 구동 모델링 프로그램을 구현하였으며, SRMD 시스템 성능분석 결과를 통해 제안하는 전차 구동 모델링 기법이 교전지점 연산성능에 어떤 영향을 주는지를 분석하여 제시하였다.

Reference

- [1] 송영덕 외, “능동파괴장치의 체계적용성 연구”, 제 14회 지상무기 학술대회, 2006.
- [2] 금동정 외, “차기전차 기동체계 설계”, 국방과학연구소 기술보고서, 2003.
- [3] 하중수 외, “하드킬 시스템을 위한 SILS 설계”, 제 16회 지상무기 학술대회, 2008.
- [4] I. M. Yaglom and A. Shields, Geometric Transformations, The Mathematical Association of America, 1962.
- [5] K. A. Stroud., Engineering Mathematics, 4th Edition, Macmillan
- [6] Kwak and Hong, Linear Algebra, Birkhauser.